



Оригинальная статья / Original article  
УДК: 550.34.(013.4+042.4)  
DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-74-84

## ИМИТАЦИОННАЯ БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ МИГРИРУЮЩЕЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

© А.В. Ключевский<sup>1</sup>, А.А. Какоурова<sup>2</sup>

Институт земной коры СО РАН,  
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

**Резюме.** Цель. Получить уравнения корреляционной связи между основными параметрами миграции сейсмичности. **Методы.** Для изучения явления миграции сейсмичности разработана имитационная базовая модель, учитывающая основные элементы и свойства мигрирующей сейсмичности. **Результаты.** При реализации модели осуществлены множественные генерации выборок из  $N$  синтезированных землетрясений и включенных цепочек из  $n$  землетрясений. На базе гипотезы эргодичности сейсмичности выполнены статистические расчеты формируемых эпицентральных полей и получены корреляционные зависимости между основными параметрами входных и выходных данных. **Заключение.** Полученные зависимости имеют степенной характер с изменяющимися показателями степени и в практическом плане дают возможность оценить уровень значимости выделения цепочек землетрясений в неоднородном эпицентральном поле реальной сейсмичности.

*Ключевые слова:* имитационная базовая модель, сейсмичность, миграции, землетрясения.

**Формат цитирования:** Ключевский А.В., Какоурова А.А. Имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 8 (115). С. 74–84. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-74-84

### BASE SIMULATION MODEL OF MIGRATING SEISMICITY

A.V. Klyuchevskii, A.A. Kakourova

Institute of the Earth Crust SB RAS,  
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

**Abstract.** The purpose of the study is to develop the equation of correlation relationship between the main parameters of seismicity migration. **Methods.** To study the phenomenon of seismicity migration a base simulation model taking into account the main elements and properties of migrating seismicity is developed. **Results.** The implementation of the model involves multiple generations of samplings from  $N$  – synthesized earthquakes and included chains from  $n$  earthquakes. Statistical calculations of generated epicentral fields have been performed on the basis of the hypotheses of seismicity ergodicity. Correlation dependences between the main parameters of input and output data have been obtained. **Conclusion.** The received dependencies are of power-mode with the changing indices of power. In practice, they provide an opportunity to assess the importance level of distinguishing the chains of earthquakes in a heterogeneous epicentral field of real seismicity.

*Keywords:* simulation base model, seismicity, migration, earthquakes

**For citation:** Klyuchevskii A.V, Kakourova A.A. Base simulation model of migrating seismicity. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016, no. 8 (115), pp. 74–84. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-74-84

### Введение

Тектонические землетрясения являются следствием упруго-пластичного деформирования литосферы Земли. Верхняя часть литосферы представляет собой находящуюся под воздействием геофизических полей различной природы и потоков

флюида иерархическую систему хрупких жестких блоков, разделенных разломами и разломными зонами [1]. Суперпозиция глобального тектонического напряжения сжатия литосферы Земли и региональных напряжений формирует повышенное гра-

<sup>1</sup>Ключевский Анатолий Васильевич, главный научный сотрудник лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии ИЭК СО РАН, e-mail: akluhev@crust.irk.ru  
Klyuchevskii Anatoly, Chief Researcher of the Laboratory of Engineering Seismology and Seismogeology of the Institute of the Earth Crust SB RAS, e-mail: akluhev@crust.irk.ru

<sup>2</sup>Какоурова Анна Александровна, аспирант ИЭК СО РАН, e-mail: anna2015@crust.irk.ru  
Kakourova Anna, Postgraduate of the Institute of the Earth Crust SB RAS, e-mail: anna2015@crust.irk.ru



диентно-неоднородное деформирование некоторых зон литосферы с диссипацией поступившей энергии в виде разрывных разрушений горных пород (землетрясения разных энергетических классов) и в виде крипа. Землетрясения обычно концентрируются на границах крупных литосферных плит, но достаточно часто они происходят вдали от границ в континентальных внутриплитных регионах, где имеются системы активных разломов, разделяющих жесткие блоки литосферы, и сохраняется наследственная геодинамическая связь с предыдущими тектоническими активизациями [2]. На региональном и локальном уровне землетрясения, как элементы сейсмичности, отражают структурную наследственную неоднородность иерархической блочной среды и перераспределение напряжений и деформаций, которые концентрируются на границах блоков в зонах разломов, генерируя землетрясения. Методы и приемы изучения сейсмичности и землетрясений совершенствуются со временем при решении теоретических и прикладных задач сейсмической безопасности, сейсмического районирования территорий и прогноза сильных землетрясений. Поскольку прогноз сильных землетрясений является чрезвычайно важной научно-практической задачей, то изучение сильных землетрясений всегда было и будет приоритетным [3]. Проведенные исследования указывают на обусловленность сильных землетрясений глобальными, региональными и локальными геодинамическими явлениями различной природы, вызвавшими изменения напряженно-деформированного или реологического состояния горных пород [4, 5, 6].

Внедрение компьютеров и вычислительных технологий позволило совершить скачок в получении новых знаний о пространственно-временном распределении землетрясений и природе сейсмичности. Эти знания лежат в основе современных теоретических и численных моделей сейсмичности, которые развиваются преимущественно как научная база для изучения пространственно-временной и энергетической структуры сейсмичности и предска-

ния сильных землетрясений [6]. Предполагается, что развитые модели сейсмичности и их объединение с феноменологией реализации землетрясения могут помочь в преодолении трудностей, связанных с отсутствием соответствующих фундаментальных уравнений и невозможностью прямых измерений в глубинах литосферы, где генерируются землетрясения [7, 8]. При решении этих и ряда других, в том числе и прикладных геофизических задач, пятимерное пространство кинематических параметров землетрясений диагностируется путем совместного анализа моделей и феноменологии: скейлинга, подобия, самоподобия, пространственно-временной корреляции, откликов на возбуждение, предсказуемости на различных масштабах осреднения, «миграции» очагов землетрясений [4, 5, 9]. «Миграции» очагов землетрясений часто рассматриваются как среднесрочные предвестники места, времени и магнитуды сильных землетрясений [10, 11 и др.]. Явление «миграции» очагов землетрясений стало широко известно из трудов Ч. Рихтера [12], который описал перемещение эпицентров сильных землетрясений вдоль Анатолийского разлома в Турции за 1939–1957 гг. В ряде работ проблемы «миграции» очагов сильных землетрясений рассматривались в связи с прогнозом сильного землетрясения [9, 10, 13–17 и др.].

Развитые представления о «миграции» очагов сильных землетрясений как о поступательном перемещении гипоцентров толчков вдоль поверхности разлома можно перенести на слабые землетрясения. Это позволит изучить феномен более детально и на большом фактическом материале, а не ждать реализации сильных землетрясений на каком-то разломе, обеспечивая длительный мониторинг. В отличие от «миграции» очагов сильных землетрясений, методика выделения которой достаточно проста [17], для установления «миграции» очагов слабых толчков необходимо разработать формализованную методику, основанную на статистическом азимутальном анализе многочисленных землетрясений небольших энергетических классов. В целом стоит за-



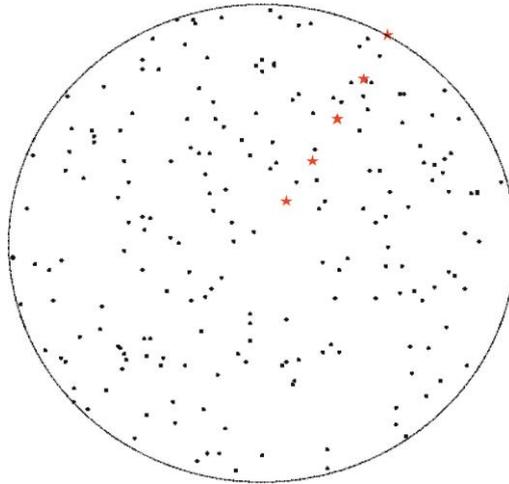
дача выделения квазилинейных цепочек землетрясений в эпицентральной поле сейсмических событий. Под цепочкой землетрясений мы понимаем квазилинейное одностороннее перемещение положения совокупности последовательных во времени эпицентров землетрясений на поверхности исследуемой области литосферы. С позиций тектонофизики и геодинамики это явление можно связать с направленной генерацией очагов землетрясений вдоль зоны сейсмотектонической деструкции геологической среды, обусловленной, как полагают [18, 19], прохождением по разломам деформационных волновых пакетов от энергетических источников. При таком подходе понятие миграции очагов землетрясений приобретает ясный физический смысл, позволяющий устранить противоречие в буквальном понимании термина «миграция» очагов землетрясений (очаги, как области разрушенной при землетрясении среды, не могут мигрировать) и использовать его без кавычек. Поскольку зона тектонической деструкции обычно является квазилинейной разломной зоной, то условие квазилинейно ориентированной временной изменчивости положения эпицентров землетрясений на поверхности Земли будет отражать поступательное направ-

ленное в одну сторону изменение расположения очагов землетрясения вдоль зоны разлома. Разломы, как правило, на мелко-масштабных тектонических картах изображаются одной прямой линией, но на картах среднего масштаба появляется возможность представить их в виде двух-трех субпараллельных кулис и приблизить изображение к природной ситуации. По масштабу развития и протяженности в Байкальском регионе выделены генеральные (длина  $L > 80$  км), региональные ( $L \approx 35-80$  км) и локальные ( $L < 35$  км) разломы [20]. Генеральные разломы представляют собой глубинные структуры с ярко выраженной кайнозойской активизацией и кулисным строением. Они имеют преобладающее северо-восточное и субширотное простирание и играют роль структур, определяющих ориентировку отдельных звеньев Байкальской рифтовой системы (БРС) и ее наиболее крупных впадин. Региональные разломы образуют очень большую группу разломов, в которой доминируют сбросы, ориентированные согласно общему простиранию БРС. Локальные разломы, преимущественно кайнозойского возраста заложения, определяют внутреннюю структуру впадин и перемычек.

### Постановка задачи, теоретические основы и общие вычислительные приемы

**Постановка задачи.** Исследованиями сейсмичности Байкальского региона установлено, что количество эпицентров землетрясений  $N$  в площадках одного размера и формы (плотность эпицентров землетрясений) сильно варьирует [21, 22, 23]. Чтобы установить статистические критерии значимости выделения цепочек землетрясений в зависимости от объема  $N$  выборки толчков в площадке, количества  $n$  землетрясений в цепочке и размеров угла сектора  $q$  по азимуту  $\alpha$  миграции, нами разработана имитационная базовая модель мигрирующей сейсмичности. В модели учитываются основные элементы и свойства мигрирующей сейсмичности: эпицентры синтезированных  $N$  землетрясений генериру-

ются на поверхности площадки круглой формы в виде случайного поля с постоянной плотностью вероятности; в заданном азимуте  $\alpha$  в это поле вставляется цепочка последовательных толчков (выборка размером  $n \geq 3$ ), имитирующих миграцию очагов землетрясений (рис. 1). Число секторов ( $m = 360/q$ ), в пределах которых располагаются квазилинейные цепочки, зависит от заданного угла  $q$  азимутального сектора поиска цепочки. В цикле генерируются наборы данных разной длины  $N$  и  $n$ , меняются величины  $\alpha$  и  $q$ , и на основании гипотезы эргодичности по полученным статистическим материалам устанавливаются корреляционные связи между входными и выходными параметрами.



*Рис. 1. Пример эпицентрального поля синтезированных 200 землетрясений: эпицентры землетрясений распределены случайно с постоянной плотностью вероятности в площадке круглой формы (точки); в азимуте  $\alpha = 30^\circ$  вставлена цепочка из пяти сейсмических событий (звездочки)*  
*Fig. 1. An example of the epicentral field of 200 synthesized earthquakes: earthquake epicenters are randomly distributed with a constant probability density in the round area (the points); in the azimuth of  $\alpha = 30^\circ$  a chain of five seismic events (asterisks) is inserted*

**Обоснование алгоритма.** Используется свойство эргодичности динамической системы сейсмичности, состоящее в том, что при слабых вариациях эндогенной энергии сейсмотектонической деформации [24] в процессе эволюции сейсмичности почти каждое состояние с определенной вероятностью проходит или расположено вблизи любого другого состояния системы (свойство аттрактора системы сейсмогенеза). Для эргодических систем математическое ожидание по временным рядам совпадает с математическим ожиданием по пространственным рядам. Поэтому для расчета или определения параметров системы можно либо долго наблюдать за поведением одного ее элемента, либо за очень короткое время рассмотреть все (или достаточно много) ее состояния, что и реализуется нами при компьютерной имитации: если система обладает свойством эргодичности, в обоих случаях получатся одинаковые статистические результаты. Преимущество эргодических динамических систем в том, что такие системы можно описывать статистическими методами, которые обычно применяются при исследованиях сейсмичности. Алгоритм базовой модели мигрирующей сейсмичности реализован в виде программы. Программа поз-

воляет сгенерировать поле эпицентров случайно распределенных в круглой площадке радиуса  $R$  синтезированных  $N$  толчков и вставить в это поле в азимуте  $\alpha$  цепочку из  $n$  событий. Далее программа разбивает площадку на угловые секторы размером  $q$ , строит гистограмму распределения сейсмических событий по секторам, а также рассчитывает для эпицентров толчков каждого сектора среднее число событий, стандартное отклонение, нормированное число толчков в каждом секторе, а также еще ряд параметров. Все эти операции выполняются в цикле заданное число раз. Дополнительно программа позволяет сгенерировать одну «большую» выборку, количество случайных событий в которой равно суммарному количеству толчков, синтезированных во всех циклах.

**Общие вычислительные приемы.** Основные элементы алгоритма, программ и вычислений сводятся к следующему:

1. Распределение эпицентров синтезированных толчков (выборка размером  $N$ ) задается случайным полем с равномерным распределением событий на круглой площадке (см. рис. 1);

2. В заданном азимуте  $\alpha$  вставляется цепочка миграции последовательных событий (цепочка размером  $n \geq 3$ );



3. Осуществляется серия генераций ( $k$ ), набирается статистика по размеру  $N_1$  и длине цепочки  $n_1$ , вычисляется математическое ожидание «кумулятивной» выборки  $M = \sum_1^m N_m / m$ , стандартное отклонение  $\sigma$  и доля превышения среднего количества землетрясений  $N_c$  в секторе с цепочкой  $\Delta\sigma = (M - N_c) / \sigma$  для соотношения  $N_1 \leftrightarrow n_1$ . Величину  $\Delta\sigma$  можно рассматривать как уровень значимости выделения цепочки.

4. Изменяется размер  $N_2$ , не меняется  $n_1$ , вычисляется математическое ожидание, стандарт и доля превышения среднего в секторе с цепочкой для соотношения  $N_2 \leftrightarrow n_1$ ;

5. Набирается статистика для получения зависимости доли стандартного отклонения  $\Delta\sigma$  от переменной  $N_{1-k}$  при цепочке из  $n_1$  событий;

6. Изменяется число событий в цепочке  $n_2$  и повторяются пункты 3-5;

7. Выполняются графические построения и находятся уравнения корреляционной связи между  $\Delta\sigma$  и размерами выборки  $N$  в зависимости от размеров угла  $q$  азимутального сектора поиска цепочки для фиксированной длины детерминированной цепочки  $n$ ;

8. Выполняются графические построения и находятся уравнения корреля-

ционной связи между размером выборки  $N$  и длиной выделенной цепочки  $n$  для фиксированной доли стандартного отклонения  $\Delta\sigma$ .

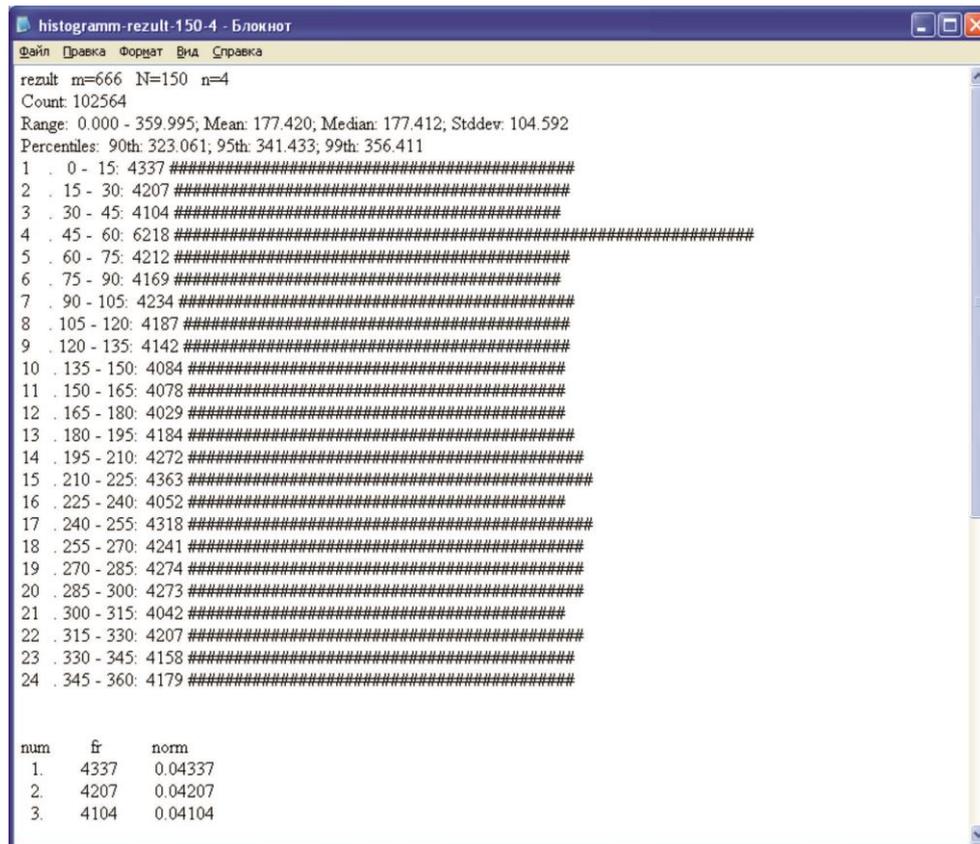
**Входные данные.** В настоящей работе генерируемые выборки состоят из  $N = 10 - 1000$  событий, длины цепочек равны  $n = 2 - 7$  событий, углы секторов  $q = 10^\circ, q = 15^\circ$  и  $q = 30^\circ$ . Начальный размер выборки  $N_0$ , шаг  $\Delta N$ , конечный размер выборки  $N_k$ , начальная длина цепочки  $n_0$ , шаг  $\Delta n$ , конечная длина цепочки  $n_k$ , размер «большой» выборки  $N_1$ , длина цепочки в «большой» выборке  $n_1$ , радиус круглой площадки  $R$ , размер сектора  $q$  и азимут цепочки  $\alpha$  задаются при запуске программы.

**Выходные данные.** Информация о каждой сгенерированной выборке, «кумулятивной» выборке и «большой» выборке записывается программой в отдельный файл, содержащий гистограмму выборок по секторам круга (рис. 2). Для ознакомления с результатами на каждой гистограмме приводится информация об использованных в вычислениях входных и выходных параметрах, а также дополнительная статистика. Дополнительно созданы файлы, в которых хранится информация, используемая для построения графиков.

## Результаты

Нами было многократно сгенерировано случайное с постоянной плотностью вероятности распределение  $N$  событий на поверхности круга, прототипом которого служило эпицентрально поле реальных землетрясений. Наложённый на это поле прототип миграции сейсмичности имитируется в виде последовательного смещения  $n$  событий в одном направлении в азимуте  $\alpha$  (в секторе углового размера  $q$ ). В результате были получены множественные искусственные каталоги суперпозиций заданных  $N$  и  $n$ . Полученные суперпозиции суммируются по секторам, формируется «кумулятивная» выборка событий, осуществляются необходимые расчеты и устанавливаются

корреляционные соотношения между размерами «кумулятивной» выборки событий  $N$  и выделяемой цепочкой событий  $n$ . На рис. 2 приведен пример «кумулятивной» гистограммы. В секторе  $\alpha = 45 - 60$  градусов хорошо выделяется накопленная в результате серии предыдущих последовательных генераций и вычислений цепочка мигрирующих событий в данном азимуте. Во всех остальных секторах эпицентры землетрясений распределены почти равномерно, и цепочка мигрирующих событий отчетливо выделяется на общем среднем фоне на уровне существенно выше  $3\sigma$ . Параметры выборок и характеристики осуществленных расчетов также отражены на рис. 2.



**Рис. 2. Пример «кумулятивной» гистограммы, полученной путем суммирования сгенерированных гистограмм**  
**Fig. 2. An example of "cumulative" histogram obtained by generated histograms summation**

Результаты расчетов величины превышения среднего уровня (в долях  $\Delta\sigma$ ) получены для угловых секторов  $q = 10$ ,  $q = 15$  и  $q = 30$  градусов. При обработке этих материалов построены графики и тренды зависимости  $\Delta\sigma(N, q)$  при фиксированной длине цепочки  $n$  (рис. 3). Графики зависимости  $N(n, q)$  при фиксированной доле  $\Delta\sigma$  представлены на рис. 4.

На рис. 3 видно, что с уменьшением размеров углового сектора  $q$  и увеличением длины цепочки  $n$  растет уровень значимости выделения цепочки  $\Delta\sigma$ .

На рис. 4 видно, что с уменьшением размеров углового сектора  $q$  и уменьшением уровня значимости  $\Delta\sigma$  выделения цепочки из  $n$  события растет количество  $N$  землетрясений в выборке.

Результаты вычислений и построений обобщены в табл. 1 и 2, в которых представлены уравнения корреляции ана-

лизируемых параметров – доли стандартного отклонения  $\Delta\sigma(N, q, n)$  (табл. 1) и размера выборки  $N(n, q, \Delta\sigma)$  (табл. 2).

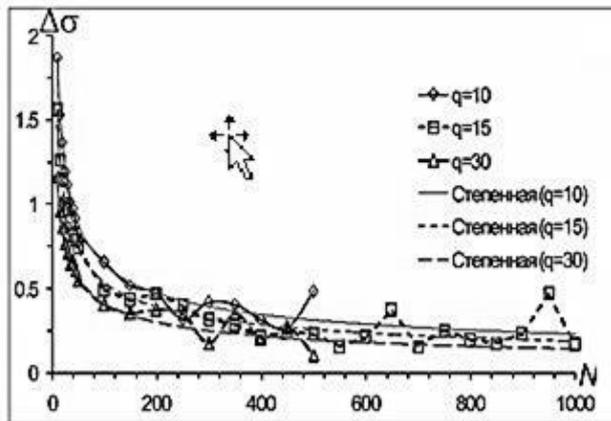
Из полученных графиков и таблиц можно сделать следующие основные выводы:

1. Установленные зависимости имеют степенной характер поведения переменных с изменяющимися показателями степени и высокими коэффициентами корреляции  $\rho$ ;

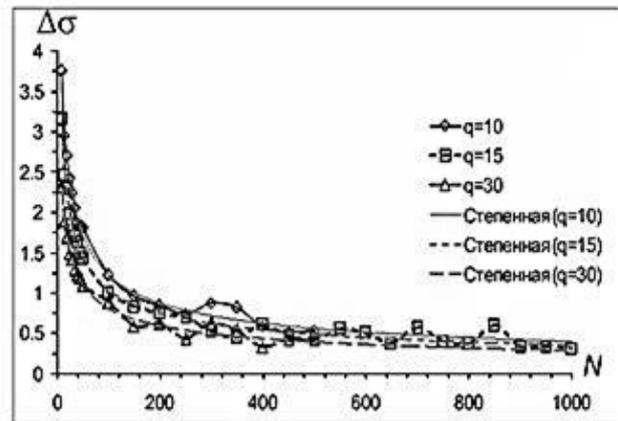
2. Чем меньше выборка  $N$  и чем длиннее цепочка  $n$ , тем выше уровень значимости выделения цепочки в одинаковых угловых секторах.

3. Уровень значимости выделения цепочки  $\Delta\sigma$  обратно пропорционален корню квадратному из количества землетрясений  $N$  в выборке данных.

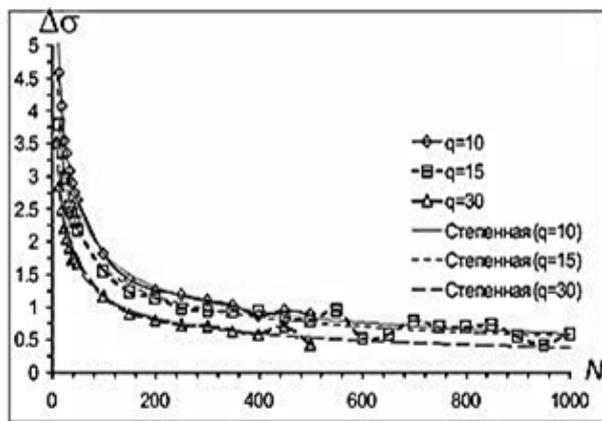
4. Размер выборки  $N$  пропорционален длине цепочки  $n$  в степени  $2,3 \div 3,0$ .



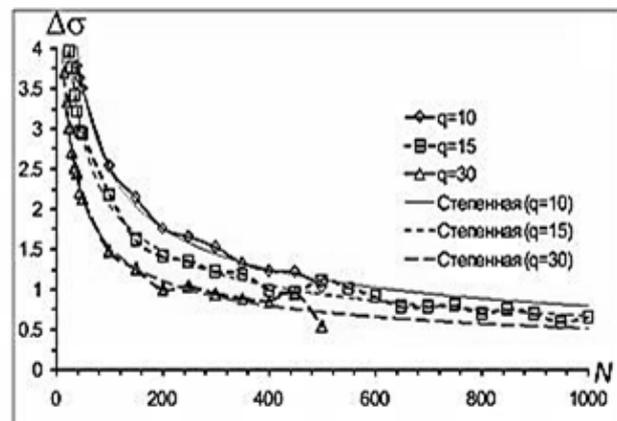
а



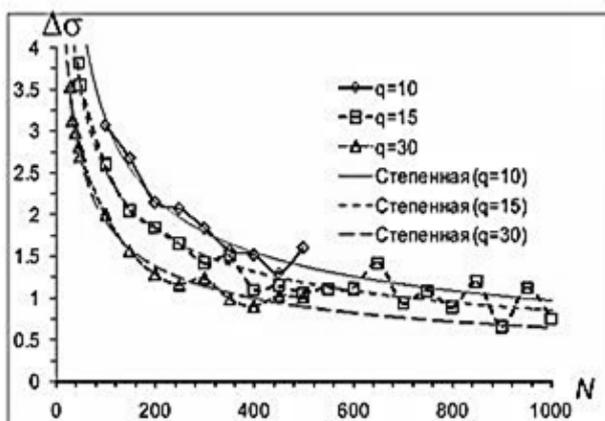
б



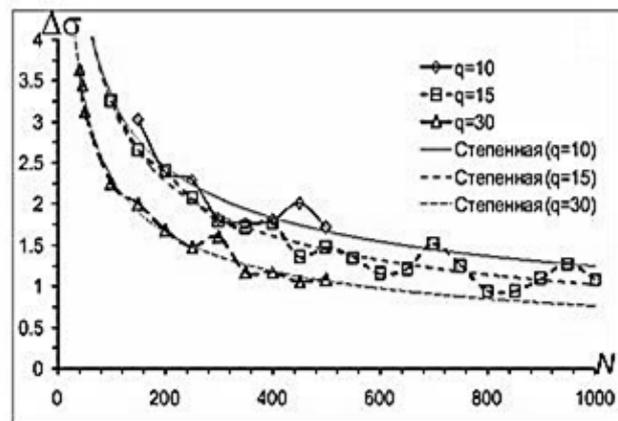
в



г



д



е

Рис. 3. Графики и тренды зависимости доли стандартного отклонения  $\Delta\sigma$  от размера выборки  $N$  для угловых секторов в 10, 15 и 30 градусов при фиксированной длине цепочки  $n$ :

а –  $n = 2$ ; б –  $n = 3$ ; в –  $n = 4$ ; г –  $n = 5$ ; д –  $n = 6$ ; е –  $n = 7$

Fig. 3. Graphs and trends of  $\Delta\sigma$  standard deviation rate dependence on the sample size  $N$  for the angular sectors of 10, 15 and 30 degrees for the fixed length of the chain  $n$ :

а –  $n = 2$ ; б –  $n = 3$ ; в –  $n = 4$ ; г –  $n = 5$ ; д –  $n = 6$ ; е –  $n = 7$

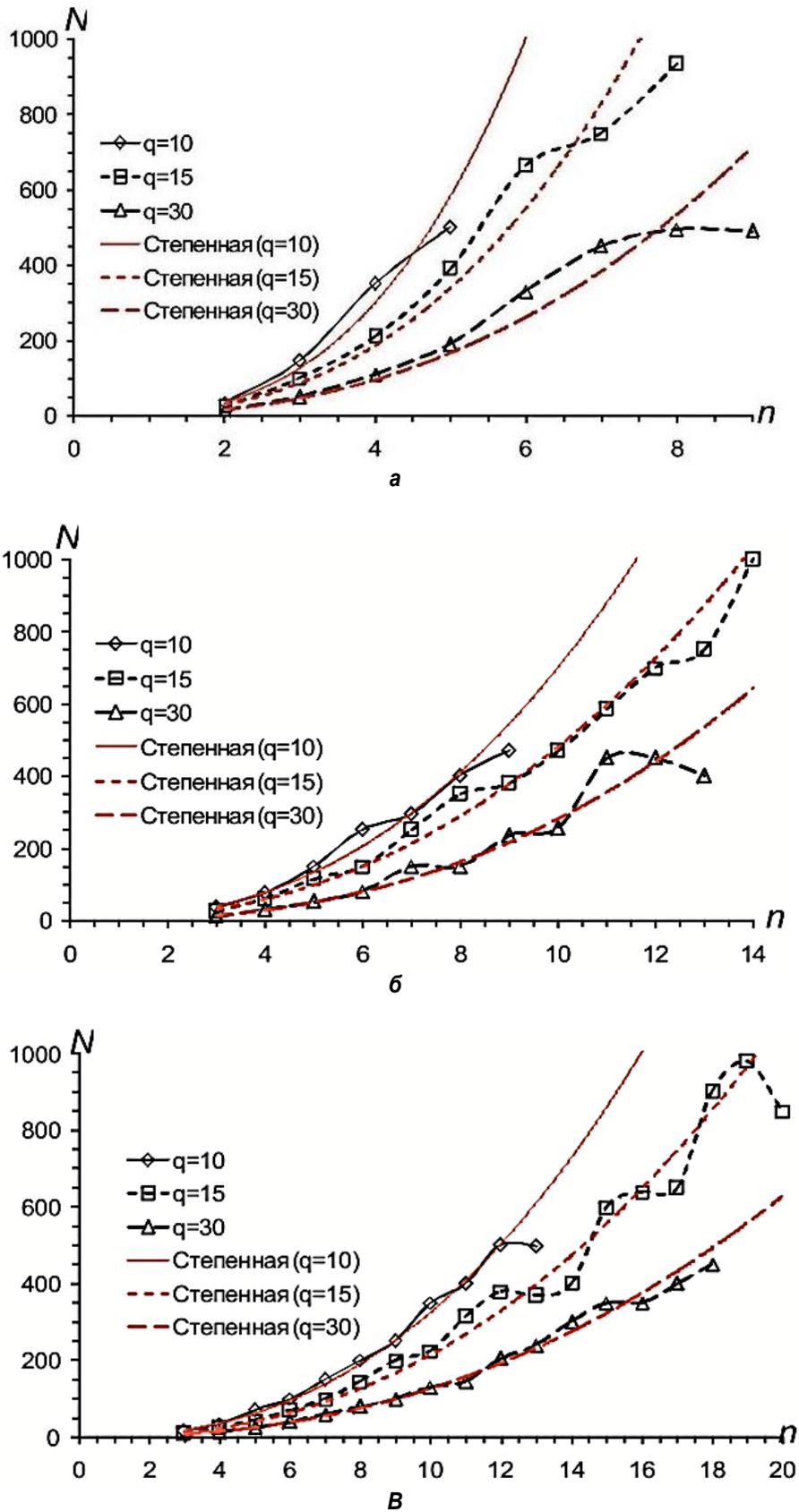


Рис. 4. Графики и тренды зависимости размера выборки  $N$  от длины выделенной цепочки  $n$  при фиксированной доле стандартного отклонения  $\Delta\sigma$ : а –  $\Delta\sigma = 1$ ; б –  $\Delta\sigma = 2$ ; в –  $\Delta\sigma = 3$   
Fig.4. Graphs and trends of the sample size  $N$  dependence on the length of the distinguished chain  $n$  for the fixed rate of standard deviation  $\Delta\sigma$ : а –  $\Delta\sigma = 1$ ; б –  $\Delta\sigma = 2$ ; в –  $\Delta\sigma = 3$



Таблица 1

Уравнения корреляции доли стандартного отклонения  $\Delta\sigma$  от размера выборки  $N$  для разных углов круговых секторов  $q$  и разного количества землетрясений в цепочке  $n$

Table 1

Correlation equations of the rate of standard deviation  $\Delta\sigma$  depending on the sample size  $N$  for the different angles of circular sectors  $q$  and a different number of earthquakes in the chain  $n$

№	$n$	$q = 10^0$	$q = 15^0$	$q = 30^0$
1	2	$\Delta\sigma = 5,04N^{-0,44}, \rho = 0,94$	$\Delta\sigma = 4,28N^{-0,45}, \rho = 0,88$	$\Delta\sigma = 3,45N^{-0,46}, \rho = 0,87$
2	3	$\Delta\sigma = 11,46N^{-0,48}, \rho = 0,98$	$\Delta\sigma = 8,84N^{-0,46}, \rho = 0,96$	$\Delta\sigma = 6,46N^{-0,45}, \rho = 0,96$
3	4	$\Delta\sigma = 17,13N^{-0,48}, \rho = 1$	$\Delta\sigma = 12,95N^{-0,45}, \rho = 0,96$	$\Delta\sigma = 10,62N^{-0,48}, \rho = 0,98$
4	5	$\Delta\sigma = 24,29N^{-0,49}, \rho = 0,99$	$\Delta\sigma = 19,71N^{-0,49}, \rho = 0,99$	$\Delta\sigma = 13,59N^{-0,47}, \rho = 0,97$
5	6	$\Delta\sigma = 32,07N^{-0,50}, \rho = 0,93$	$\Delta\sigma = 22,07N^{-0,47}, \rho = 0,90$	$\Delta\sigma = 17,14N^{-0,47}, \rho = 0,98$
6	7	$\Delta\sigma = 23,18N^{-0,42}, \rho = 0,80$	$\Delta\sigma = 32,39N^{-0,50}, \rho = 0,91$	$\Delta\sigma = 21,39N^{-0,48}, \rho = 0,98$

Таблица 2

Уравнения корреляции размера выборки  $N$  и длины детерминированной цепочки землетрясений  $n$  для разных углов круговых секторов  $q$  и разной доли  $\Delta\sigma$

Table 2

Correlation equations of the sample size  $N$  and the length of the determined earthquake chain  $n$  for the different angles of circular sectors  $q$  and a different rate of  $\Delta\sigma$

$\Delta\sigma$	$q = 10^0$	$q = 15^0$	$q = 30^0$
1	$N = 4,95n^{2,97}, \rho = 0,98$	$N = 4,76n^{2,65}, \rho = 0,98$	$N = 3,21n^{2,46}, \rho = 0,97$
2	$N = 2,80n^{2,40}, \rho = 0,98$	$N = 2,55n^{2,28}, \rho = 0,99$	$N = 0,99n^{2,46}, \rho = 0,98$
3	$N = 1,26n^{2,41}, \rho = 0,99$	$N = 1,01n^{2,33}, \rho = 0,99$	$N = 0,63n^{2,31}, \rho = 1$

### Заключение

Для изучения явления миграции очагов землетрясений разработана имитационная базовая модель, учитывающая основные элементы и свойства мигрирующей сейсмичности. При реализации модели разработаны программы, осуществлены множественные генерации выборок из  $N$  синтезированных землетрясений и включенных цепочек из  $n$  землетрясений. С учетом гипотезы эргодичности сейсмичности применен алгоритм обработки эпицентральных полей землетрясений, проведены вычисления и

получены необходимые статистические материалы, обработка которых дает возможность оценки значимости выделения линейной цепочки из нескольких событий в случайном эпицентральной поле землетрясений. Полученные зависимости имеют степенной характер с изменяющимися показателями степени и в практическом плане дают возможность оценить уровень значимости выделения цепочек землетрясений в неоднородном эпицентральной поле реальной сейсмичности.

### Библиографический список

1. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
2. Новая глобальная тектоника. М.: Мир, 1974. 472 с.
3. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
4. Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. Москва, 2005. С. 54.
5. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
6. International handbook of earthquake and engineering seismology, 2002. Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C. & Kisslinger C. (eds.) Academic Press, Amsterdam, Boston, New York, Tokyo, Part A, 934 pp.
7. Анализ геодинамических и сейсмических про-



цессов // Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС. 2004. Вып. 35. 329 с.

8. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности // Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС. 2001. Вып. 32. 303 с.

9. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993. № 4. С. 43–53.

10. Бот М. О проблеме предсказания землетрясений // Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1968. С. 9–20.

11. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

12. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. М.: Из-во Иностранная литература, 1963. 670 с.

13. Вилькович Е.В., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. Волны тектонических деформаций на крупных разломах // Докл. АН СССР. 1974. Т. 219. № 1. С. 77–80.

14. Новопашина А.В. Методика выявления миграций сейсмической активности Прибайкалья средствами ГИС // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 33–36.

15. Duda S. J. Global earthquakes 1903–1985. Hamburg F.R. Germany: NEIC. 1992. 183 p.

16. Levina E.A., Ruzhich V.V. (2015). The seismicity migration study based on space-time diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (2), 225–240. DOI:10.5800/GT-2015-6-2-0178.

17. Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. of the Earthquake Res. Inst. 1968. V. 46. P. 53–74.

18. Быков В.Г. Деформационные волны земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176–1190 с.

19. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 150 с.

20. Шерман С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.

21. Зуев Ф.Л., Ключевский А.В. Вычислительные аспекты характеристик самоподобия сейсмичности // Вестник ИрГТУ. 2015. № 3 (98). С. 71–75.

22. Ключевский А.В. Сейсмичность в условиях самоорганизации Байкальской рифтовой системы // Доклады Академии наук. 2005. Т. 403. № 1. С. 96–100.

23. Ключевский А.В., Зуев Ф.Л. Структура поля эпицентров землетрясений Байкальского региона // Доклады Академии наук. 2007. Т. 415. № 5. С. 682–687.

24. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Энергетическая структура сейсмичности юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464. № 5. С. 611–617.

#### References

1. Sadvovskii M.A., Bolkhovitinov L.G., Pisarenko V.F. Deformirovanie geofizicheskoi sredy i seismicheskii protsess [Geophysical environment deformation and a seismic process]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 101 p. (In Russian)

2. Novaya global'naya tektonika [New global tectonics]. Moscow, Mir Publ., 1974. 472 p. (In Russian)

3. Zav'yalov A.D. Srednesrochnyi prognoz zemletryaseni: osnovy, metodika, realizatsiya [Mid-term earthquake prediction: foundations, methodology, implementation]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 254 p. (In Russian)

4. Smirnov V. B., Ponomarev A. V. Zakonomernosti relaksatsii seismicheskogo rezhima [Seismic mode relaxation regularities]. *Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornyx porod: Sb. nauch. tr. [Physical bases of rock fracture forecasting: Collection of scientific articles].* Moscow, 2005. P. 54. (In Russian)

5. Sobolev G. A., Ponomarev A. V. Fizika zemletryaseni i predvestniki [Physics of earthquakes and precursors]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 270 p. (In Russian)

6. International handbook of earthquake and engineering seismology, 2002. Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C. & Kisslinger C. (eds.) Academic Press, Amsterdam, Boston, New York, Tokyo, Part A, 934 pp.

7. Analiz geodinamicheskikh i seismicheskikh protsessov: [Analysis of geodynamic and seismic processes: Collection of scientific articles]. *Vychislitel'naya*

seismologiya. Moscow, GEOS Publ., 2004, issue 35, 329 p. (In Russian)

8. Problemy dinamiki litosfery i seismichnosti [Problems of lithosphere and seismicity dynamics]. *Vychislitel'naya seismologiya [Computational seismology].* Moscow, GEOS Publ., 2001, issue 32, 303 p. (In Russian)

9. Ulomov V.I. Volny seismogeodinamicheskoi aktivizatsii i dolgosrochnyi prognoz zemletryaseni [Seismogeodynamic activity waves and longterm earthquake prediction]. *Fizika Zemli [Earth Physics].* 1993, no. 4, pp. 43–53. (In Russian)

10. Bot M. O probleme predskazaniya zemletryaseni [On the problem of earthquake prediction]. *Predskazanie zemletryaseni [Earthquake prediction].* Moscow, Mir publ., 1968, pp. 9–20. (In Russian)

11. Kasakhara K. Mekhanika zemletryaseni [Earthquake mechanics]. Moscow, Mir publ., 1985. 264 p.

12. Rikhter Ch. Elementarnaya seismologiya [Elementary seismology]. Moscow, Iz-vo Inostrannaya literature Publ., 1963. 670 p. (In Russian)

13. Vil'kovich E.V., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I. Volny tektonicheskikh deformatsii na krupnykh razlomakh: Dokl. AN SSSR [Waves of tectonic deformation on large faults: Reports of the Academy of Sciences of the USSR]. 1974, vol. 219, no 1, pp. 77–80. (In Russian)

14. Novopashina A.V. Metodika vyyavleniya migratsii seismicheskoi aktivnosti Pribaikal'ya sredstvami GIS [GIS-based methods for Baikal region seismic activity migration determination]. *Geoinformatika [Geoformat-*



- ics]. 2013, no. 1, pp. 33–36. (In Russian)
15. Duda S. J. Global earthquakes 1903–1985. Hamburg F.R. Germany: NEIC. 1992. 183 p.
16. Levina E.A., Ruzhich V.V. (2015). The seismicity migration study based on space-time diagrams. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (2), 225–240. DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0178.
17. Mogi K. Migration of seismic activity // *Bull. of the Earthquake Res. Inst.* 1968, vol. 46. P. 53–74.
18. Bykov V.G. Deformatsionnye volny zemli: kontsepsiya, nablyudeniya i modeli [Stress-related waves of the Earth: theory, field data, and models]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*. 2005, vol. 46, no. 11, pp. 1176–1190. (In Russian)
19. Vikulin A.V. Fizika volnovogo seismicheskogo protsessa [Physics of a wave seismic process]. Petro-pavlovsk-Kamchatskii, KGPU Publ., 2003. 150 p.
20. Sherman S. I. Fizicheskie zakonomernosti razvitiya razlomov zemnoi kory [Physical regularities in the development of earth crust faults]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 102 p. (In Russian)
21. Zuev F.L., Klyuchevskii A.V. Vychislitel'nye aspekty kharakteristik samopodobiya seismichnosti [Computation aspects of seismicity self-similarity characteristics].

#### Критерии авторства

Ключевский А.В., Какоурова А.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Статья поступила 06.06.2016 г.*

- Vestnik of Irkutsk State Technical University [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 3 (98), pp. 71–75. (In Russian)
22. Klyuchevskii A.V. Seismichnost' v usloviyakh samoorganizatsii Baikalskoi riftovoi sistemy [Seismicity under conditions of the Baikal rift system self-organization]. *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of sciences]*. 2005, vol. 403, no 5, pp. 785–788. (In Russian)
23. Klyuchevskii A.V., Zuev F.L. Struktura polya epitsentrov zemletryaseniya Baikalskogo regiona [Structure of the earthquake epicenter field in the Baikal region]. *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of sciences]*. 2007, vol. 415, no. 2, pp. 944–949. (In Russian) DOI: 10.1134/S1028334X07060268
24. Klyuchevskii A.V., Dem'yanovich V.M., Klyuchevskaya A.A. Energeticheskaya struktura seismichnosti yugo-zapadnogo flanga Baikalskoi riftovoi zony [Seismicity energy structure at the southwestern flank of the Baikal rift system]. *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of sciences]*. 2015, vol. 464, no. 2, pp. 1069–1074. (In Russian) DOI: 10.1134/S1028334X15100141

#### Contribution

Klyuchevskii A.V., Kakourova A.A. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

*The article was received on 06 June 2016*